

METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING SHAPE**Akte**

Patent Number: JP8233552

Publication date: 1996-09-13

Inventor(s): ICHIKAWA HAJIME

Applicant(s):: NIKON CORP

Requested Patent: JP8233552

Application Number: JP19950040672 19950228

Priority Number(s):

IPC Classification: G01B11/24

EC Classification:

Equivalents:

Abstract

PURPOSE: To accurately measure the shape error of an optical surface by rotating interference fringe data to be a reference by a predetermined angle, and subtracting rotationally averaged data obtained by averaging the data of each rotation from reference data.

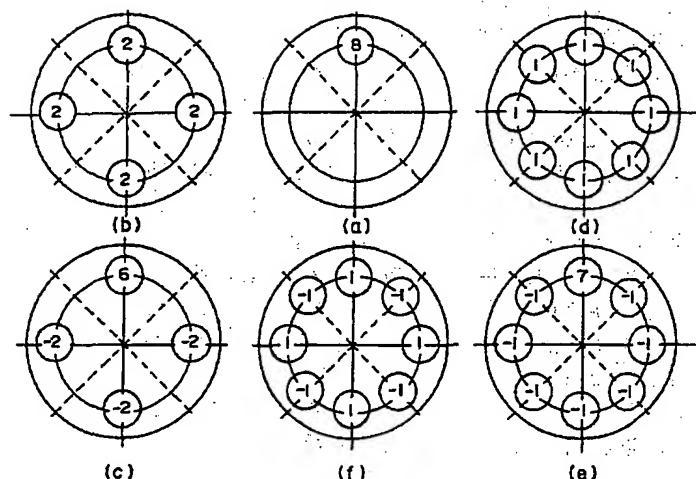
CONSTITUTION: An optical system 120 interferes the reflected lights from a surface 1a to be detected and the Fizeau surface 2a of a reference surface, and generates an interference fringe. A CCD camera 130 images the generated fringe, and sends the image information to a calculator 150. As the order of the measurement, interference fringe data to be a reference is first decided, the reference data is rotated by a predetermined angle, and data of each rotation is averaged. The obtained averaged data is subtracted from reference data, and the non-rotationally symmetrical component of the reference data is obtained. Further, laterally deviated data in which the reference data is moved by a predetermined amount in a predetermined direction is subtracted from the reference data, and a rotationally symmetrical component is obtained. The shape corresponding to the reference data is obtained based on the added data of the non-rotationally symmetrical component and the rotational symmetrical component.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(10)

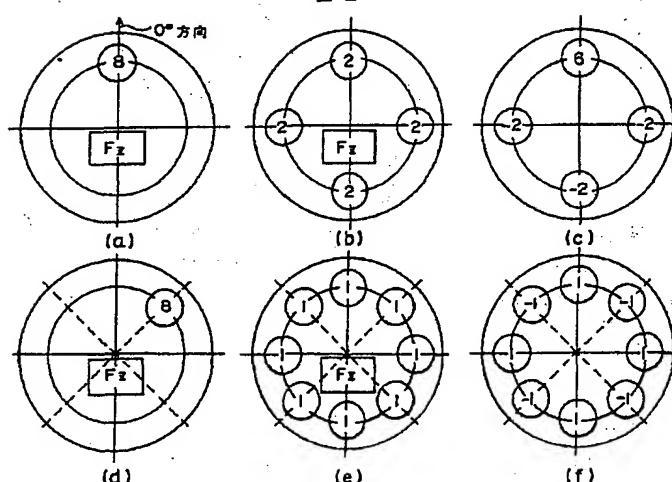
【図1】

図1



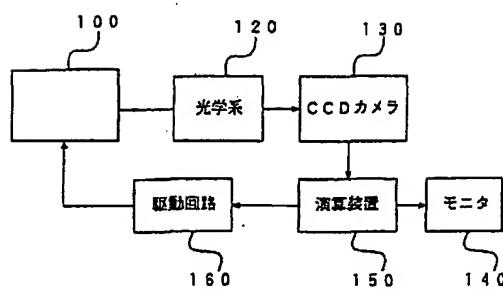
【図2】

図2

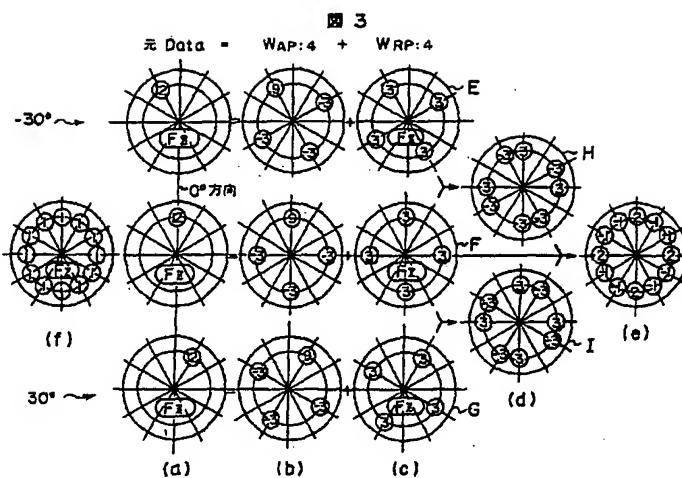


【図5】

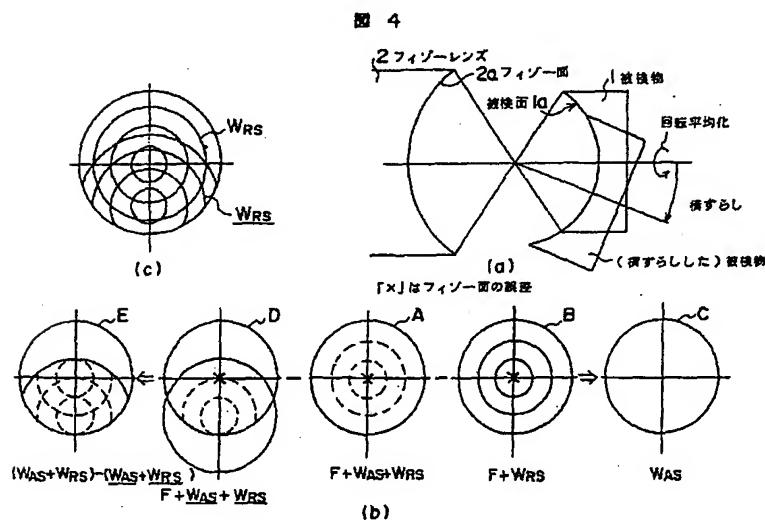
図5



【図3】



【図4】



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-233552

(43)公開日 平成8年(1996)9月13日

(51) Int.Cl.⁶
G 01 B 11/24

識別記号 庁内整理番号

F I
G O 1 B 11/24

技術表示箇所

卷之三十一

(22) 出願日 平成 7 年(1995) 2 月 28 日

審査請求 未請求 請求項の数 2 OL (全 11 頁)

(71)出願人 000004112
株式会社ニコン
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 市川 元
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
式会社ニコン内

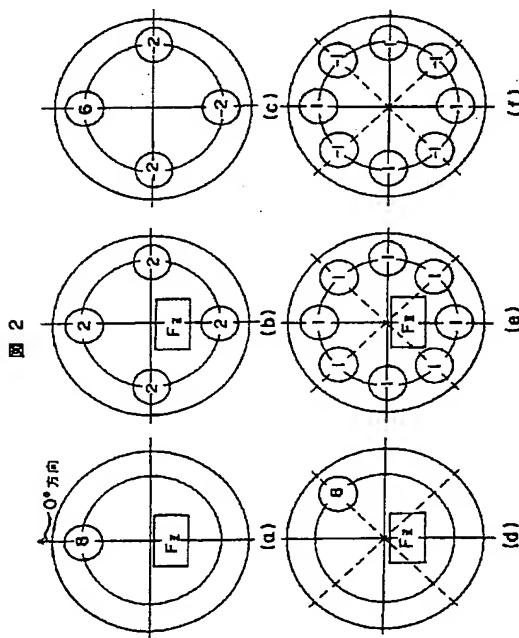
(74)代理人 弁理士 三品 岩男 (外1名)

(54) 【発明の名称】 形状測定方法および装置

(57) 【要約】

【目的】回転平均化の回数を等価的に増加し、光学面の形状を高精度に測定可能な形状測定手段を提供すること。

〔構成〕 第1および第2の未知の誤差形状が重疊した既知の誤差形状から、前記第1および第2の未知の誤差形状のうち少なくとも一方に対して、その回転対称成分と非回転対称成分とに分離した演算処理を行なうことにより、前記第1および第2の未知の誤差形状のうち少なくとも一方を分離する方法である波面創成抽出法において、前記回転対称成分の平均化回数（n回）に対応する分割角度 α に対して、該分割角度 α の $1/m$ 倍の分割角度を β とした時、さらに、 $\beta \times i$ ($i = 1 \sim m - 1$) の回転を、前記第1および第2の未知の誤差形状のうち少なくとも一方に与えることにより、該回転対称成分の平均化回数を等価的に「 $n \times m$ 」に増加する形状測定方法である。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】基準となる干渉縞データ（基準データ）を、予め定めた角度だけ回転していき、予め定めた角度だけの回転ごとのデータを加算平均する、回転平均化を行ない、求めた回転平均化データを、前記基準データから減算し、基準データの非回転対称成分（基準データから、回転平均化を行なって求めた成分である「回転対称成分」を減算した成分）を求め、さらに、基準データを所定方向に所定量だけ移動した、横ずらしデータを、前記基準データから減算し、減算したデータに基づいて、回転対称成分を求め、前記非回転対称成分と前記回転対称成分の加算データに基づいて、基準データに対応する形状を求める形状測定方法であって、前記回転平均化データは、前記基準データを、前記回転平均化の回数（n回）に対し予め定めた角度 α を回転角度として回転平均化のデータを求め、さらに、前記角度 α の $1/m$ 倍（mは、整数）の角度を β とした時、 $\beta \times i$ （ $i = 1 \sim m - 1$ ）の回転を前記基準データに与えて回転させたデータを生成し、該生成したデータと、前記回転角度 α とした回転平均化のデータとを加算平均して求めたデータとすることを特徴とする形状測定方法。

【請求項2】被検面と参照面を有する干渉計と、干渉縞データを取得する撮像手段と、前記被検面を変位可能とする変位手段と、干渉縞データを処理する機能を有する処理手段とを有し、前記処理手段は、被検面と参照面とを所定の位置に設定することにより、前記撮像手段によって、基準となる干渉縞データ（基準データ）を得る手段と、該被検面を、予め定めた角度だけ回転していき、予め定めた角度だけの回転ごとのデータを加算平均する、回転平均化を行ない、求めた回転平均化データを、前記基準データから減算し、該被検面の非回転対称成分（基準データから、回転平均化を行なって求めた成分である「回転対称成分」を減算した成分）を求める手段と、該被検面を所定方向に所定量だけ移動する手段と、該手段の駆動により得られる干渉縞データである、横ずらしデータを、前記基準データから減算し、減算したデータに基づいて、回転対称成分を求め、前記非回転対称成分と前記回転対称成分の加算データに基づいて、該被検面に対応する形状を求める手段と、該被検面を、前記回転平均化の回数（n回）に対し予め定めた角度 α を回転角度として回転平均化のデータを求める手段と、前記角度 α の $1/m$ 倍（mは、整数）の角度を β とした時、 $\beta \times i$ （ $i = 1 \sim m - 1$ ）の回転を該被検面に与えて回転させたデータを生成する手段と、該生成したデータと前記回転角度 α とした回転平均化のデータとを加算平均して求めたデータを、回転平均化データとする手段とを備えることを特徴とする形状測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

2

【産業上の利用分野】本発明は、形状データを回転平均化する回数を等価的に増加し、各種の光学面の形状誤差を、高精度で絶対校正するための形状測定手段に関する。

【0002】

【従来の技術】光学面の形状誤差（真球度、平面度）を絶対校正する一手法として、特開平5-223537号公報にて開示された「波面創成抽出法」が提案されている。また、この手法を実行するための詳細な演算アルゴリズムについては、特願平5-185786号公報「データ処理方法」等の公報に記載されている。

【0003】なお、本明細書中で頻繁に使用する「形状誤差」なる語は、理想的形状からの誤差値を意味する。

【0004】さて、この手法の測定原理を、図4(a)に示すフィゾー干渉計による測定の例で説明する。

【0005】なお、図示はしないが、図4(a)に示すフィゾー干渉計は、干渉縞を撮影するためのCCDカメラと、干渉縞データに対し所定の処理を行なう演算装置と、被検物を移動する移動機構と、演算結果を出力するモニターを少なくとも備えている。

【0006】まず、被検面の形状誤差を「W」、フィゾー一面2aの形状誤差を「F」で表す。

【0007】また、被検面の形状誤差Wを、回転対称成分（以降、「添字：RS」で表す）と、非回転対称成分（以降、「添字：AS」で表す）に分解して考える。

【0008】ここで、「回転対称成分」とは、「ある形状誤差データを、被検面のアーチャ中心に連続的に回転させて平均化したデータである回転平均化データ」と定義し、一方、「非回転対称成分」とは、「元の形状誤差データから、回転対称成分を減算したデータ」と定義する。即ち、元の形状誤差データは、回転対称成分と非回転対称成分との和で表される。

【0009】したがって、この時、「 $W = WAS + WRS$ 」なる関係式が成立する。

【0010】先ず、図4(a)に示すような配置状態から、図に示すように、被検面1aを、フィゾー一面2aに対して横ずらしさせずに測定したデータをD1とすると、次式が成立する。

【0011】「 $D_1 = F + WAS + WRS$ 」なる関係式である。

【0012】次に、同様の配置状態で、被検面を回転平均化したデータをD2とすると、次式が成立する。

【0013】「 $D_2 = F + WRS$ 」なる関係式である。

【0014】これは、非回転対称成分WASが、回転平均化処理を行なうことにより、「0」となるという性質に基づく。

【0015】従って、両データを演算装置内で減算すると、「 $D_1 - D_2 = WAS$ 」となり、非回転対称成分WASが求まる。

【0016】最後に、図4(a)に示す配置状態で、被

3

検面1aを、フィゾー面2aに対して横ずらしして測定したデータをD3とすると、次式が成立する。

【0017】 $D_3 = F + \underline{WAS} + \underline{WRS}$ の関係が成立する。ここで、下線は、横ずらしに対応するデータを表す。

【0018】このデータD3を、演算装置によって、元データD1から減算する処理を行なうと、以下の式が成立する。

【0019】 $D_1 - D_3 = WAS + WRS - \underline{WAS} - \underline{WRS}$ なる関係式である。

【0020】以上の測定演算手順を、図4(b)に図示した。

【0021】図の中心部に示した「X」印は、フィゾー面の誤差Fを表す。また、実線の同心円状パターンは、回転対称成分のうちのWRSのみを、点線の同心円状パターンは、被検面の形状誤差W (=WAS+WRS) を表している。

【0022】なお、図4(b)に示す「A」データ(元データ)を回転平均化すると、「B」データが求まり、さらに、「A」データから「B」データを減算すると、非回転対称成分WASを表す「C」データが求まる。

【0023】一方、「A」データ(元データ)を、横ずらししたデータが「D」データであり、さらに、「A」データから「D」データを減算すると、「WAS+WRS-WAS-WRS」なる成分を表す「E」データが求まる。

【0024】図4(b)は、このような様子を、模式的に表現している。

【0025】さて、前述のようにWASは、既に求まっているから、既知データを左辺に移行して、前述の式を書き直すと、「 $D_1 - D_3 - (WAS - \underline{WAS}) = WRS - \underline{WRS}$ 」となる。

【0026】これと同様の演算を行った結果を表すと、図4(c)に示すような、WRS、WRSに対する等高線パターンが重畠したデータとなる。

【0027】パターン形状は既知形状(同心円状)であるので、この既知のパターンの一方の等高線をなぞって高さ情報を求ることによって、他方のパターンの形状が抽出でき、WRSが求まることになる。以上の演算等によって、WAS、WRSが各々求まることになる。

【0028】したがって、「 $W \equiv WAS + WRS$ 」なる関係式から、被検面の真球度誤差が求まることになる。

【0029】

【発明が解決しようとする課題】さて、以上説明してきた波面創成抽出法において、例えば、特開平5-223541号公報等の公報にて開示されているように、被検面形状誤差を回転平均化処理する際に、被検面を回転可能な移動機構を設け、該移動機構によって、被検面を連続的に回転させ、干渉計によって生成した干渉縞を検出する手段である、CCDカメラが備えるCCD素子の電荷蓄積効果を利用すれば、回転平均化の誤差は無いと

4

言える。しかしながら、このような方法によって、回転平均化の誤差を生じさせないようにするための装置構成が必要となり、このような方法を行なうための専用装置が必要となる。

【0030】なお、簡便に波面創成抽出法を適用する場合には、被検面を、ディスクリートに、即ち、360度を略均等にn分割した角度だけ回転させる毎に、形状測定を行い、その形状測定データを演算装置が備えるメモリに記憶した後、演算装置内で、それらの形状測定データを加算平均処理することにより、回転平均化を行えば良い。

【0031】しかしながら、このようなディスクリートな回転平均化処理による測定誤差は、被検面の形状誤差が小さい場合には、無視しうるほど小さく問題はないものの、一方、被検面の形状誤差が大きくなるにしたがって、また、被検面に周期的な誤差が重畠している場合には、もはや無視できない程度の誤差量になってしまう。

【0032】というのは、回転対称成分の抽出は、被検面を横ずらしした際の重畠領域の全面データを平均化しながら演算を行なうことによって実行しているため、抽出された回転対称成分が本質的に誤差を有してしまうことになるからである。

【0033】この誤差は、前記分割数nを増やすことにより、減少させることができるが、逆に、分割数nに比例して、形状を測定するための測定時間が増加し、その結果、フィゾー面の経時変化に起因する誤差が、新たに生じてしまう場合があった。

【0034】そこで、本発明は、測定演算方法を改良することにより、上記従来技術で生じ得る問題点に対処するものであり、光学面の形状誤差を高精度に測定するための形状測定手段を提供すること目的とする。

【0035】

【課題を解決するための手段】上記問題を解決し、本発明の目的を達成するために、以下の手段が考えられる。

【0036】すなわち、基準となる干渉縞データ(基準データ)を、予め定めた角度だけ回転していき、予め定めた角度だけの回転ごとのデータを加算平均する、回転平均化を行ない、求めた回転平均化データを、前記基準データから減算し、基準データの非回転対称成分(基準データから、回転平均化を行なって求めた成分である

「回転対称成分」を減算した成分)を求め、さらに、基準データを所定方向に所定量だけ移動した、横ずらしデータを、前記基準データから減算し、減算したデータに基づいて、回転対称成分を求め、前記非回転対称成分と前記回転対称成分の加算データに基づいて、基準データに対応する形状を求める形状測定方法であって、前記回転平均化データは、前記基準データを、前記回転平均化の回数(n回)に対し予め定めた角度αを回転角度として回転平均化のデータを求め、さらに、前記角度αの1/m倍(mは、整数)の角度をβとした時、 $\beta \times i$ (i

$= 1 \sim m - 1$ の回転を前記基準データに与えて回転させたデータを生成し、該生成したデータと、前記回転角度 α とした回転平均化のデータとを加算平均して求めたデータとする方法である。

【0037】

【作用】形状測定を行なうためには、通常、以下のよう手順で行なう。

【0038】まず、基準となる干渉縞データ（基準データ）を測定する。

【0039】そして、この基準データを予め定めた角度だけ回転していき、予め定めた角度だけの回転ごとのデータを加算平均する。即ち、回転平均化を行なって、求めた回転平均化データを、前記基準データから減算し、基準データの非回転対称成分を求める。

【0040】さらに、基準データを所定方向に所定量だけ移動した、横ずらしデータを、前記基準データから減算し、減算したデータに基づいて、回転対称成分を求める。

【0041】そして、前記非回転対称成分と前記回転対称成分の加算データに基づいて、基準データに対応する形状を求める。

【0042】さて、本発明においては、前記回転平均化データを次のようにして求める。

【0043】まず、前記基準データを、前記回転平均化の回数（n回）に対し予め定めた角度 α を回転角度として回転平均化のデータを求める。さらに、前記角度 α の $1/m$ 倍（mは、整数）の角度を β とした時、 $\beta \times i$ ($i = 1 \sim m - 1$) の回転を前記基準データに与えて回転させたデータを生成する。そして、該生成したデータと、前記回転角度 α とした回転平均化のデータとを加算平均して求めたデータを、前記回転平均化データとする。

【0044】

【実施例】以下、本発明にかかる実施例を、図面を参照しつつ説明する。

【0045】図5に、システムの全体構成の一例である構成図を示す。

【0046】本システムは、測定系100と、光学系120と、CCDカメラ130と、演算装置150と、モニタ140とを有して構成される。

【0047】測定系100は、図4(a)に示す構成を有する測定系である。光学系120は、被検面1aと参照面であるフィゾー面2aからの反射光を干渉させ、干渉縞を生成する。CCDカメラ130は、生成された干渉縞を撮像し、撮像した画像情報を演算装置150に送る。

【0048】演算装置150は、干渉縞の画像情報を、以下に説明するような画像処理方法によって処理して、被検面1aの形状測定を行ない、測定結果をモニタ140に表示する。

【0049】なお、干渉縞が高精度に求まった後は、例えば、得られた干渉縞の縞間隔のデータを用いて、所定の基準点からの高さ情報を求め、被検面の全面形状を求める方法等が一般に使用されている。このような方法は、公知、公用であるため本実施例中では詳細に説明することは避ける。

【0050】さて、本発明にかかる被検面の測定、演算手順を以下に説明する。

【0051】なお、以下に示す処理は、演算装置150が行なう。もちろん、必要なデータは、移動機構の移動動作により、所望のアライメント設定がされた状態で取得される。

【0052】データの収集は、CCDカメラ130が撮影する撮影情報を、演算装置150が取得することによって行なわれる。

【0053】「 2π 」を均等にn分割して、被検面1aをディスクリートに回転させては、その形状データを測定し、「各回転角度 = $(i \times 2\pi) / n$ ($i = 0 \sim n - 1$)」での被検面1aの形状誤差データW[i]を平均化することにより、回転平均化を不連続に行なう場合には、周期的回転対称成分を「添字:RP」で表し、それに対応する非回転対称成分を「添字:AP」で表すこととする。

【0054】この時、「 $WRP \equiv \sum W[i] / n$ (Σ は、 $i = 0 \sim n - 1$ についての総和を表す)」、「 $WAP \equiv W - WRP$ 」、「 $\sum WAP[i] = 0$ 」、「 $\lim_{n \rightarrow \infty} WRP \rightarrow WRS$ 」等の関係が成立する。これらの式が成立するのは、従来技術の欄でも述べたとおりである。

【0055】さて、まず、図1(a)に示すような、被検面の形状誤差「W」を仮定する。

【0056】図1(a)に示す、被検面の形状誤差「W」(元データ)は、ある高さの単位を「1」としたとき、「8」単位の高さを有する形状データが、元データとして得られたことを意味する。このように、図中の各数字は、高さ情報を表す。

【0057】このようなデータの収集は、CCDカメラ130の撮像情報を、演算装置150が演算処理することによって行なえる。

【0058】次に、図1(b)は、 $n = 4$ の場合の回転平均化データ「WRP:4」である。

【0059】図1(a)に示す元データを、90度毎に回転させたデータを加算平均する回転平均化処理を行なうと、図1(b)に示すようなデータとなる。

【0060】そして、図1(a)に示す元データ「W」から、図1(b)に示す回転平均化データを減算すると、 $n = 4$ の場合の非回転対象成分「WAP:4」が求まり、そのデータは、図1(c)に示すようになる。なお、添字「:n」は、回転平均化の回数n (= 4) を表す。

【0061】次に、後述する高精度化指標m = 2に対応

する、 $n = 8 (= 4 \times m)$ の場合の回転平均化データ「WRP:8」、および、元データWから、WRP:8を減算したデータ、「WAP:8」は、それぞれ、図1 (d)、(e) に示すようになる。

【0062】ここで、回転平均化の回数nに対応する回転角度の単位である分割角度を「 $2\pi/n$ 」として回転平均化し、さらに、m分割した角度「 $2\pi/(n \times m)$ 」だけ、データを回転させることによって回転平均化する演算を、K[n, m]によって表現する。また、この「m」を、高精度化指数と称することにする。

【0063】回転平均化データに関してのみ、演算K[n, m]を行なうことによって、回転平均化の回数nを、等価的に「 $n \times m$ 」とすることが可能である。

【0064】本実施例の場合には、図1 (a)、(b)、(c)を参照すると分かるように、「WRP:8 = (WRP:4 + WRP:4 × K[4, 2]) / 2」の関係が成り立つ。本発明では、この性質を利用している。

【0065】一般に、nを充分大きくして、干渉計によって生成される干渉縞を検出するセンサの分解能以下に回転平均化が行われるのが、理想的な回転平均化であり、この場合、回転対称成分、「WRS」を抽出する際に誤差が乗らない。

【0066】nが大きくとれない場合でも、一般に、nを可能な限り大きくとった方が、抽出された回転対称成分「WRS」に重複する誤差が少ない。

【0067】したがって、「真の回転対称成分「WRS」に対する、回転平均化の回数nの場合に抽出された回転対称成分「WRP:n」の誤差である、真の回転平均化誤差TRG[n]」の代わりに、「高精度化指数mに対応する、仮の回転対称成分「WRP:n*m」に対する、回転平均化回数nの場合に抽出された回転対称成分「WRP:n」の誤差である、仮の回転平均化誤差FRG[n, m]」を代用することを考える。

【0068】このFRG[n, m]に関しては、一般的に以下の関係式が成立する。

【0069】即ち、 $FRG[n, m] = WRP:n - WRP:n * m = WAP:n * m - WAP:n$ なる関係式が成立する。

【0070】本実施例の場合、FRG[4, 2]は、図1 (f) に示すようになる。

【0071】そして、「 $FRG[4, 2] = WRP:4 - WRP:8 = WAP:8 - WAP:4$ 」となる。

【0072】さて、このFRG[4, 2]は、演算K[n, m]を使用すれば、前記「 $WRP:8 = (WRP:4 + WRP:4 \times K[4, 2]) / 2$ 」の関係式を用いて、以下の通り算出可能である。

【0073】即ち、図1 (b) に示す「WRP:4」に、演算K[4, 2]を施して、演算Kを施す前の元データ「WRP:4」から減算すれば、FRG[4, 2]が求まる。これを数式で表せば、以下のようにになる。

【0074】即ち、「 $WRP:4 - WRP:4 \times K[4, 2] =$

$WRP:4 - (2 \times WRP:8 - WRP:4) = 2 \times (WRP:4 - WRP:8) = 2 \times FRG[4, 2]$ 」となる。

【0075】以上の関係を考慮して、実際の測定データから、フィゾ一面の形状誤差を除去しつつ、回転平均化回数を等価的に増加させる手法を、図2、図4等を参照して説明する。なお、前記の演算に関する記載に合わせて、最初の平均化回数n=4、高精度化指数m=2と仮定するが、これ例外の条件設定でも、本発明の原理に影響しないことは言うまでも無い。

10 【0076】(No. 1) : 図1 (a) に示す被検面1aと同じ形状を有する被検面の形状誤差を仮定し、図2 (a) に示すような、フィゾ一面誤差が重複した、0度方向の規準データを、「D:4[0]」で表す。フィゾ一面誤差は、「Fz」なる記号で図示している。なお、式中では、「F」で表現している。

【0077】図4 (a) に示す測定系(図5、100に対応)で、被検面1aの有効面の略中心を軸として、被検物1を「 $\pi/2$ 」ずつ回転させては、その状態で形状データを測定することにより、被検面1aの形状誤差Wを回転平均化するための測定データを得る。

【0078】この各回転時に得られる測定データを「D:4[i]」(i=0~3)と表すと、「D:4[i] = F + W:4[i]」と、「D:4[i]」が分解される。

【0079】ここで、小括弧内の数字は、図2 (a) に示す0度方向を規準とした場合の、被検面1aの時計回りの分割回転方向を表す。具体的には、i=0は0度、i=1は90度、i=2は180度、i=3は0度270度に相当する。

【0080】この時、前述した定義式「 $WAP \equiv W - WP$ 」から、各iについて、「 $W[i] = WAP:4[i] + WRP:4[0]$ 」と分解できるから、上記「D:4[i]」に代入して、「 $D:4[i] = F + WAP:4[i] + WRP:4[0]$ 」と変形できる。

【0081】なお、「WRP:4[i]」は周期性を有しており、i=0(0度)、1(90度)、2(180度)、3(270度)に対しては、同じ形状となるため、「WRP:4[0]」で代表して表している。

【0082】(No. 2) : 次に、高精度化指数m=2に対応した測定として、被検面1aの有効面の略中心部を回転軸として、被検物1を、0度方向を規準として、時計回りに「 $(\pi/2)/m = \pi/4$ 」だけ回転させ、回転状態の数だけ形状測定を行なう。得られる測定データは、「D:4[45]」と表記することができ、図2 (d) に示す状態である。

【0083】(No. 3) : 図4 (a) に示すように、被検面1aを有する被検物1を、任意の方向に、任意の量(但し、被検面の半径以下)だけ、いわゆる横ずらしした後、被検面1aとフィゾ一面2aとを干渉させ、その状態を測定する。なお、横ずらしは、図示しない移動手段によって行なわれる。

9

【0084】得られる測定データを「D:4 [0]」と表すこととする（下線は、被検物1を横ずらして取得したデータであることを示す）。この時、「D:4 [0]」は、「D:4 [0] = F + WAP:4 [0] + WRP:4 [0]」と分解できる。

【0085】(No. 4) : (No. 1) で得られた4個の測定データ「D:4 [i]」を、演算装置内で平均化処理する。このとき得られたデータを「DAV:4」と表記する。

【0086】この時、前述した演算原理で述べた関係式「 $\sum WAP[i] = 0$ 」から、回転平均化データ「DAV:4」は、「 $DAV:4 \equiv \sum D:4[i] / n = \sum (F + WAP:4[i] + WRP:4[0]) / n = F + \sum (WAP:4[i]) + WRP:4[0] = F + WRP:4[0]$ 」となり、図2(b)で表されるように誤差が存在する。

【0087】すなわち、図2(b)に示すデータは、図2(a)に示すデータを90度毎に回転し、その各々のデータを平均した、即ち、図2(a)に示すデータを回転平均化したデータである。この場合、フィゾ一面誤差「Fz」が、存在している。

【0088】(No. 5) : 演算装置によって、この回転平均化データ「DAV:4」を、4個の測定データの内の1つのデータである、0度方向の規準データ「D:4[0]」から減算すると、以下の式が成立する。

【0089】即ち、「 $D:4[0] - DAV:4 = (F + WAP:4[0] + WRP:4[0]) - (F + WRP:4[0]) = WAP:4[0]$ 」が演算により求まり、図2(c)に示すようなデータが得られる。図を見て分かるように、フィゾ一面誤差「Fz」が除去されている。

【0090】(No. 6) : 0度方向の規準データ「D:4[0]」と、(No. 2)において得られた測定データ「D:4[45]」とを、演算装置によって加算平均すると、「 $(D:4[0] + D:4[45]) / 2 = (F + WAP:4[0] + WRP:4[0]) + (F + WAP:4[45] + WRP:4[45]) / 2$ 」となる。

【0091】そして、左辺に既知データを移項すると、「 $T1 \equiv ((D:4[0] + D:4[45]) - (WAP:4[0] + WAP:4[45])) / 2 = F + (WRP:4[0] + WRP:4[45]) / 2 = F + WRP:8[0]$ 」となる。

【0092】この式は、結果的に、図2(e)に示すようなデータが得られることを示している。また、この式の変形には、前述の関係式である、「 $WRP:8 = (WRP:4 + WRP:4 \times K[4, 2]) / 2$ 」なる関係式を用いている。

【0093】(No. 7) : (No. 4)において得られた演算データ「DAV:4」から、「No. 6」において得られた演算データ「T1」を、演算装置によって減算すると、「 $DAV:4 - T1 = (F + WRP:4[0]) - (F + WRP:8[0]) = WRP:4[0] - WRP:8[0] \equiv FRG[4, 2] \equiv WAP:8[0] - WAP:4[0]$ 」が求まり、この式

10

が表すデータは、図2(f)に示すようなデータとなる。

【0094】即ち、図2(f)に示すデータは、図2(b)に示すデータから、図2(e)に示すデータを減算したデータとなる。

【0095】なお、前述した、(No. 6)と(No. 7)の手順は、以下のような手順にしても良い。

【0096】(No. 6および7) : 0度方向の規準データ「D:4[0]」と、(No. 2)で得られた測定データ

10 「D:4[45]」を、演算装置によって減算平均すると、「 $(D:4[0] - D:4[45]) / 2 = (F + WAP:4[0] + WRP:4[0]) - (F + WAP:4[45] + WRP:4[45]) / 2$ 」となる。そして、左辺に既知のデータを移項すると、「 $T2 \equiv ((D:4[0] - D:4[45]) - (WAP:4[0] - WAP:4[45])) / 2 = (WRP:4[0] - WRP:4[45]) / 2 = (WRP:4[0] - (2 \times WRP:8[0] - WRP:4[0])) / 2 = WRP:4[0] - WRP:8[0] \equiv FRG[4, 2]$ 」となり、図2(f)に示すデータが、直接得されることになる。

20 20 【0097】また、この場合の式の変形においても同様に、前述した関係式「 $WRP:8 = (WRP:4 + WRP:4 \times K[4, 2]) / 2$ 」を用いている。

【0098】(No. 8) : (No. 3)において得られた測定データ「D:4[0]」から、0度方向の規準データ「D:4[0]」を、演算装置によって減算すると、「 $D:4[0] - D:4[0] = (F + WAP:4[0] + WRP:4[0]) - (F + WAP:4[0] + WRP:4[0]) = (WAP:4[0] + WRP:4[0]) - (WAP:4[0] + WRP:4[0])$ 」となる。

30 30 【0099】そして、左辺に既知データを移項すると、「 $T3 \equiv (D:4[0] - D:4[0]) - (WAP:4[0] - WAP:4[0]) = WRP:4[0] - WRP:4[0]$ 」となる。

【0100】(No. 9) : (No. 7)において得られた演算データ「FRG[4, 2]」を、(No. 3)における横ずらし測定と同じ被検面位置まで、演算装置内で、横ずらしした演算データ「FRG[4, 2]」から、元データ「FRG[4, 2]」を演算装置内で減算すると、「 $T4 \equiv FRG[4, 2] - FRG[4, 2] = (WRP:4[0] - WRP:8[0]) - (WRP:4[0] - WRP:8[0])$ 」となる。

40 40 【0101】(No. 10) : (No. 8)において得られた演算データ「T3」から、(No. 9)において得られた演算データ「T4」を、演算装置によって減算すると、「 $T3 - T4 \equiv (WRP:4[0] - WRP:4[0]) - ((WRP:4[0] - WRP:8[0]) - (WRP:4[0] - WRP:8[0])) = WRP:8[0] - WRP:8[0]$ 」と変形できる。

【0102】この、「n=8」の場合の、周期的回転対称成分が重畠したデータは、回転平均化の回数が等価的

11

に増加しているため、「 $n=4$ 」の場合と比較して、周期的な誤差がより緩和され、低減されている。

【0103】したがって、略等高線の性質を利用すれば、抽出された「WRP:8 [0]」の誤差(WRSに対する)も低減される。

【0104】(No. 11) : (No. 5)で得られた「WAP:4 [0]」、(No. 7)で得られた「FRG [4, 2] ≡ WRP:4 [0] - WRP:8 [0]」、および、(No. 10)で得られた「WRP:8 [0]」を演算装置によって加算すれば、「WAP:4 [0] + (WRP:4 [0] - WRP:8 [0]) + WRP:8 [0] = WAP:4 [0] + WRP:4 [0] = W」となり、被検面の絶対形状が求まることとなる。

【0105】以上の演算において、回転対称成分の抽出は、結果的に、 $n=8$ の回転平均化を行ったことになるから、高精度化指數 $m=2$ の処理が可能となる場合について説明したことになるが、これは一例にすぎない。*

表1

m=1 (従来法)		m=2		m=3	
n × m	T	n × m	T	n × m	T
2	3	4	4	6	5
3	4	6	5	9	6
4	5	8	6	12	7
5	6	10	7	15	8
6	7	12	8	18	9
7	8	14	9	21	10
8	9	16	10	24	11

【0111】なお、 n と m とを選択する際には、最適値が存在する。具体的には、「 $n+m=T$ (定数)」の条件を満たしながら、等価平均回転化回数「 $n \times m$ 」を最大にする解は、「 $n=m$ 」の時である。

【0112】また、演算K[n, m]に相当する、回転平均化のための操作の回数の種類を「モード」と称することとする。このモードの値は、例えば、「1」から順に付していくことが考えられる。

【0113】したがって、前記最適解は、「モード=1」の場合のものであり、複数モードを採用すれば、以下の実施例のように、回転平均化回数に対する測定回数

40 総数の比率を下げる事が可能となる。

【0114】次に、本発明にかかる他の実施例を図3を参照して説明する。

【0115】本実施例は、K[4, 3]の場合、即ち、最初の回転平均回数 $n=4$ の測定に対して、高精度化指數 $m=3$ の処理を行った実施例である。

【0116】(No. 1) : 図3(a)に示すような、フィゾ一面誤差(Fz)が重疊した、0度方向の規準データを、「D:4 [0]」で表す。なお、図を見て分かるように、フィゾ一面誤差は、「Fz」で示している。

50 【0117】図4(a)と同様の測定系によって、被検

13

面1 aの有効面の略中心を回転軸として、被検物1を「 $\pi/2$ 」ずつ回転させても、その状態で、形状を測定することにより、被検面1 aの形状誤差Wを回転平均化するための測定データを得る。

【0118】この各回転時に得られる測定データを、「D:4 [i]」(i=0~3)と表すと、「D:4 [i]」は、次式の様に分解される。

【0119】即ち「D:4 [i] = F+W:4 [i]」と分解される。

【0120】ここで、小括弧内の数字は、図3 (a) の0度方向を標準とした場合の、被検面1 aの時計回り方向の分割回転角度(この角度ごとに回転していく)を表す。

【0121】具体的には、i=0には0度、i=1には90度、i=2には180度、i=3には270度が対応する。

【0122】この時、前述の定義式「WAP≡W-WRP」に基づいて、各iについて、「W [i] = WAP:4 [i] + WRP:4 [0]」と分解できるから、上記「D:4 [i]」に代入して、「D:4 [i] = F+WAP:4 [i] + WRP:4 [0]」と変形できる。

【0123】なお、「WRP:4 [i]」は周期性を有するため、i=1(0度に相当)、i=2(90度に相当)、i=3(180度に相当)、i=4(270度に相当)に対しては、同じ形状となるため、「WRP:4 [0]」で代表して表現することとする。

【0124】(No. 2) : 高精度化指数m=3に対応した測定として、被検面1 aの有効面の略中心を回転軸として、被検物1を、0度方向を標準として「±($\pi/2$) / m = $\pi/6$ 」だけ回転させ、その状態の形状データだけを測定する。

【0125】得られる測定データは、「D:4 [-3 0]」、「D:4 [30]」と表記することができ、図3 (a)に、その状態を表す。なお、図3における数値は、図1等と同様に、高さを示すデータであり、同心円は、回転対象成分を表す。

【0126】(No. 3) : (No. 1)において得られた4個の測定データ「D:4 [i]」を、演算装置によって平均化演算する。得られたデータを、「DAV:4」と表記する。この時、前述した関係式を用いて、「 $\Sigma WAP [i] = 0$ 」なる関係式から、回転平均化データ“DAV:4”は、「DAV:4 ≡ $\Sigma D:4 [i] / n = \Sigma (F + WAP:4 [i] + WRP:4 [0]) / n = F + \Sigma (WAP:4 [i] + WRP:4 [0]) / n = F + WRP:4 [0]$ 」となり、図3 (c)で表されるデータとなる。このデータには、フィゾー形状誤差が重複している。図3 (a)で表される、「-30度方向(上段)」、「0度方向(中段)」、「30度方向(下段)」の各元データに対して、回転平均化処理を行なわれたようになっているのが、図3 (c)に示すデータであり、さらに、図3 (a)のデータか

14

ら、図3 (c)に示すデータを減算したものが、図3 (b)で表されるデータとなっている。

【0127】(No. 4) : 演算装置によって、この回転平均化データ「DAV:4」を、4個の測定データの内の1つである、0度方向の標準データ「D:4 [0]」から減算すると、「D:4 [0] - DAV:4 = (F + WAP:4 [0] + WRP:4 [0]) - (F + WRP:4 [0]) = WAP:4 [0]」が演算により求まり、図3 (b)に示すようなデータが得られる。

【0128】このように、図3 (b)、(c)には、「D:4 [-30]」、「D:4 [30]」に対する、「WAP:4 [±30]」、「WRP:4 [±30]」のデータも併せて図示している。

【0129】(No. 5) : 0度方向の標準データ「D:4 [0]」と(No. 2)で得られた測定データ「D:4 [±30]」とを演算装置によって減算したデータを、加算平均すると以下のようになる。

【0130】 $\{\Sigma (D:4 [0] - D:4 [±30]) / 3 = (\Sigma (F + WAP:4 [0] + WRP:4 [0]) - \Sigma (F + WAP:4 [±30] + WRP:4 [±30])) / 3 = [2 \times (WAP:4 [0] + WRP:4 [0])] - (\Sigma WAP:4 [±30] + \Sigma WRP:4 [±30])\} / 3$ と変形できる。

【0131】そして、左辺に既知データを移項すると、次式の様になる。

【0132】即ち、「T5 ≡ $\Sigma (D:4 [0] - \Sigma D:4 [±30]) / 3 - (2 \times WAP:4 [0] - \Sigma WAP:4 [±30]) / 3 = (2 \times WRP:4 [0] - \Sigma WRP:4 [±30]) / 3$ 」となり、前述の関係式、即ち、「WRP:12 = (WRP:4 + Σ WRP:4 × K [4, 3]) / 3」なる関係式を用いる

【0133】30と、「T5 = {2 × WRP:4 [0] - (3 × WRP:12 [0] - WRP:4 [0])} / 3 = WRP:4 [0] - WRP:12 [0] ≡ FRG [4, 2]」となる。この式は、図3 (d)の状態を経て、図3 (e)のデータが得られることを意味する。

【0134】40すなわち、図中FとEのデータを減算することにより、データHが得られ、図中FとGのデータを減算することによりデータIが得られ、さらに、データHとデータIを加算し、3で割ったものが、図3 (e)に示すデータとなる。また、最終的に求めたい、回転平均化された図3 (f)に示すようなデータを求めるためには、データFから、図3 (e)に示すデータを減算すれば求まる。

【0135】40(No. 6) : その他の手順は、K [4, 3]を行なう場合と全く同様である。

【0136】以上40の演算において、回転対称成分の抽出は、結果的に、n=12の回転平均化を行なうことになるから、高精度化指数m=3の処理が可能となっていることが分かる。

【0137】50次に、さらに、他の実施例について説明する。本実施例では、最初の実施例で説明した測定原理を

13

面1aの有効面の略中心を回転軸として、被検物1を「 $\pi/2$ 」ずつ回転させては、その状態で、形状を測定することにより、被検面1aの形状誤差Wを回転平均化するための測定データを得る。

【0118】この各回転時に得られる測定データを、「D:4 [i]」(i=0~3)と表すと、「D:4 [i]」は、次式の様に分解される。

【0119】即ち「D:4 [i] = F + W:4 [i]」と分解される。

【0120】ここで、小括弧内の数字は、図3(a)の0度方向を標準とした場合の、被検面1aの時計回り方向の分割回転角度(この角度ごとに回転していく)を表す。

【0121】具体的には、i=0には0度、i=1には90度、i=2には180度、i=3には270度が対応する。

【0122】この時、前述の定義式「WAP≡W-WRP」に基づいて、各iについて、「W [i] = WAP:4 [i] + WRP:4 [0]」と分解できるから、上記「D:4 [i]」に代入して、「D:4 [i] = F + WAP:4 [i] + WRP:4 [0]」と変形できる。

【0123】なお、「WRP:4 [i]」は周期性を有するため、i=1(0度に相当)、i=2(90度に相当)、i=3(180度に相当)、i=4(270度に相当)に対しては、同じ形状となるため、「WRP:4 [0]」で代表して表現することとする。

【0124】(No. 2)：高精度化指数m=3に対応した測定として、被検面1aの有効面の略中心を回転軸として、被検物1を、0度方向を標準として「 $\pm(\pi/2)$ 」/m=π/6だけ回転させ、その状態の形状データだけを測定する。

【0125】得られる測定データは、「D:4 [-3 0]」、「D:4 [30]」と表記することができ、図3(a)に、その状態を表す。なお、図3における数値は、図1等と同様に、高さを示すデータであり、同心円は、回転対象成分を表す。

【0126】(No. 3)：(No. 1)において得られた4個の測定データ「D:4 [i]」を、演算装置によって平均化演算する。得られたデータを、「DAV:4」と表記する。この時、前述した関係式を用いて、「 $\sum WAP [i] = 0$ 」なる関係式から、回転平均化データ“DAV:4”は、「 $DAV:4 \equiv \sum D:4 [i] / n = \sum (F + WAP:4 [i] + WRP:4 [0]) / n = F + \sum (WAP:4 [i] + WRP:4 [0]) / n = F + WRP:4 [0]$ 」となり、図3(c)で表されるデータとなる。このデータには、フィゾー形状誤差が重複している。図3(a)で表される、「-30度方向(上段)」、「0度方向(中段)」、「30度方向(下段)」の各元データに対して、回転平均化処理を行なわれたようになっているのが、図3(c)に示すデータであり、さらに、図3(a)のデータか

14

ら、図3(c)に示すデータを減算したものが、図3(b)で表されるデータとなっている。

【0127】(No. 4)：演算装置によって、この回転平均化データ「DAV:4」を、4個の測定データの内の1つである、0度方向の標準データ「D:4 [0]」から減算すると、「D:4 [0] - DAV:4 = (F + WAP:4 [0] + WRP:4 [0]) - (F + WRP:4 [0]) = WAP:4 [0]」が演算により求まり、図3(b)に示すようなデータが得られる。

10 【0128】このように、図3(b)、(c)には、「D:4 [-30]」、「D:4 [30]」に対する、「WAP:4 [±30]」、「WRP:4 [±30]」のデータも併せて図示している。

【0129】(No. 5)：0度方向の標準データ「D:4 [0]」と(No. 2)で得られた測定データ「D:4 [±30]」とを演算装置によって減算したデータを、加算平均すると以下のようになる。

【0130】「 $\sum (D:4 [0] - D:4 [±30]) / 3 = (\sum (F + WAP:4 [0] + WRP:4 [0])) - \sum (F + W$

20 AP:4 [±30] + WRP:4 [±30]) / 3 = \{2 \times (WAP:4 [0] + WRP:4 [0]) - (\sum WAP:4 [±30] + \sum WRP:4 [±30])\} / 3」と変形できる。

【0131】そして、左辺に既知データを移項すると、次式の様になる。

【0132】即ち、「 $T5 \equiv \sum (D:4 [0] - \sum D:4 [±30]) / 3 - (2 \times WAP:4 [0] - \sum WAP:4 [±30]) / 3 = (2 \times WRP:4 [0] - \sum WRP:4 [±30]) / 3$ 」

となり、前述の関係式、即ち、「 $WRP:12 = (WRP:4 + \sum WRP:4 \times K [4, 3]) / 3$ 」なる関係式を用いる

30 と、「 $T5 = \{2 \times WRP:4 [0] + (3 \times WRP:12 [0] - WRP:4 [0])\} / 3 = WRP:4 [0] - WRP:12 [0] \equiv F RG [4, 2]$ 」となる。この式は、図3(d)の状態を経て、図3(e)のデータが得られるこ

とを意味する。

【0133】すなわち、図中FとEのデータを減算することにより、データHが得られ、図中FとGのデータを減算することによりデータIが得られ、さらに、データHとデータIを加算し、3で割ったものが、図3(e)に示すデータとなる。また、最終的に求めたい、回転平均化された図3(f)に示すようなデータを求めるためには、データFから、図3(e)に示すデータを減算すれば求まる。

【0134】(No. 6)：その他の手順は、K [4, 3]を行なう場合と全く同様である。

【0135】以上の演算において、回転対称成分の抽出は、結果的に、n=12の回転平均化を行なうことになるから、高精度化指数m=3の処理が可能となっていることが分かる。

50 【0136】次に、さらに、他の実施例について説明する。本実施例では、最初の実施例で説明した測定原理を

15

応用し、複数モードを使用して最大の測定効率が得られる測定、演算手順を示す。

【0137】なお、以下に示す $n[i]$ 、 $m[i]$ は、 i 番目の操作（回転平均化、横ずらし）に対応する前記 n 、 m の値であり、 $n[i] \equiv n[i-1] \times m[i-1]$ なる関係式が成立する。また、各 i 番目のモードに対応する測定回数総数 $T[i]$ は、 $T[i] \equiv m[i] - 1$ となる。

【0138】さらに、 i 番目のモードまでに要した累計測定回数 $R[i]$ は、 $R[i] \equiv R[i-1] + T[i]$ となる。

【0139】(No. 1) : 前述のように「 $n=m$ 」なる条件が、測定効率的に最適な条件であるので、まず、平均化するために最低限必要な、「 $n[0] = 2$ 」に対して、「 $n[0] = m[0] = 2$ 」となる測定を行う。この時、等価平均回転化回数は「 $m[1] \equiv n[0] \times m[0] = 4$ 」、測定回数総数 $T[0]$ は、「 $T[0] \equiv n[0] + m[0] = 4$ 」、累計測定回数 $R[0]$ は、「 $R[0] \equiv T[0] = 4$ 」となる。

【0140】(No. 2) : 横ずらしは、(No. 1)において行った 1 回だけで済むから、測定効率的に最適な条件は、「 $n + (m-1) = T-1$ (定数)」の条件を満たしながら、等価平均回転化回数「 $n \times m$ 」を最大とする解となり、結局「 $n=m$ 」が最適解となる。

【0141】但し、この解は、単モード時のものであり、複数モードを許容すれば、「 $n=p \wedge q$ (八は、べき乗を表す)」の方が、より測定回数が少なくなり得る。

【0142】例えば、単モード時は、「 $n[1] = m[1] = 4$ 」であるから、等価平均回転化回数は「 $n[2] \equiv n[1] \times m[1] = 16$ 」、測定回数総数 $T[1]$ は、「 $T[1] \equiv m[1] - 1 = 3$ 」、累計測定回数 $R[1]$ は、「 $R[1] \equiv R[0] + T[1] = 4 + 3 = 7$ 」となる。

【0143】一方、複数モード時は、「 $n[1] = 4 = 2^2$ 」であるから、「 $m[1] = m[2] = 2$ 」の測定が考えられる。この時、最初のモードでは、等価平均回転化回数は「 $n[2] \equiv n[1] \times m[1] = 4 \times 2 = 8$ 」、測定回数総数 $T[1]$ は、「 $T[1] \equiv m[1] - 1 = 1$ 」、累計測定回数 $R[1]$ は、「 $R[1] \equiv R[0] + T[1] = 4 + 1 = 5$ 」となり、さらに、さらに、次のモードでは、等価平均回転化回数は「 $n[2] \equiv n[1] \times m[1] = 8 \times 2 = 16$ 」、測定回数総数 $T[2]$ は、「 $T[2] \equiv m[2] - 1 = 1$ 」、累計測定回数 $R[2]$ は、「 $R[2] \equiv R[1] + T[2] = 5 + 1 = 6$ 」となる。

16

【0144】両者を比較すれば、複数モード時の測定回数総数の方が少なくなることが分かる。

【0145】(No. 3) : この、「 2^2 」測定を繰り返して行けば、等価平均回転化回数 n は、等比級数的に増加する。即ち、最初の「 $T[0] = 4$ 」回の測定を「1 回の高精度化処理」と見なすと、 k 回目の高精度化処理後の等価平均回転化回数 $n[k]$ は、「 $n[k] = 2^{k+1}$ 」となり、 k 回目の高精度化処理後の累計測定回数 $R[k]$ は、「 $R[k] \equiv R[0] + (k-1) = 4 + (k-1) = k+3$ 」となる。

【0146】例えば、測定回数総数 = 9 (回) の場合、従来の波面創成抽出法によれば、平均化回転数は、8 (回) であるのに対し、本手法によれば、 $2^2 = 128$ 回の等価平均回転化が可能となる。

【0147】(No. 4) : 以下同様の、最適条件を与える測定を繰り返して行き、前述した「理想的な回転平均化」が行なわれるまで処理を行えば、回転対称成分 WRS を抽出する際の誤差は、殆ど「0」に等しくなる。

【0148】以上述べてきたように本発明によれば、等価的に回転平均化の回数を増加させ、光学面の形状誤差を、高い測定精度で測定することが可能となる。

【0149】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、光学面の形状誤差（誤差を含めた実際の形状）を、高い測定精度で測定することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理の説明図である。

【図2】本発明の原理の説明図である。

【図3】本発明にかかる第2実施例の説明図である。

【図4】従来技術の説明図である。

【図5】本発明にかかるシステムの構成図である。

【符号の説明】

1…被検物、1a…被検面、2…フィゾーレンズ、2a…フィゾ一面
40